

УДК 625.711:621.574.4

РОЗРОБКА ПРОГРАМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО РОЗРАХУНКУ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШАРІВ ПОКРИТТЯ ТА ОСНОВИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИМІРЮВАННЯ ЧАШІ ПРОГИНІВ

Ряпухін В.М., канд. техн. наук, професор

Батракова А.Г., д-р техн. наук, доцент

Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ)

Дорожній одяг вважають міцним, якщо він здатний витримувати короточасні повторні навантаження без порушення основних експлуатаційних показників якості. При цьому дорожня конструкція повинна працювати весь розрахунковий період тільки у пружній стадії – такі вимоги чинного методу розрахунку [1], і таким же вимогам повинні відповідати методи її польових випробувань при максимальному наближенні схеми випробування до реальної схеми взаємодії з експлуатаційними навантаженнями. Важливою вимогою, крім того, повинна бути простота, незначна вартість і надійність методів оцінки міцності дорожніх одягів.

В більшості випадків методи визначення міцності дорожніх одягів зводяться до визначення величини прогину з наступним розрахунком модуля пружності [2]. Сама міцність змінюється із зміною водно-теплових процесів в річному циклі, тому важливо пружній прогин фіксувати в найбільш несприятливий період роботи під експлуатаційними навантаженнями дорожнього одягу.

В останні роки найбільш широко використовуються три методи визначення міцності дорожніх одягів:

- вимірювання прогину під жорстким штампом;
- вимірювання прогину під колесом автомобіля;
- вимірювання прогину і деяких динамічних характеристик установками динамічного навантаження.

Ці методи дозволяють визначати загальний еквівалентний модуль конструкції, але не дають змоги проаналізувати деформаційні та міцнісні характеристики шарів дорожнього одягу або покриття та основи окремо. Вимірюючи прогин поверхні дорожнього одягу під навантаженням, можна визначити експериментально (коректно за експериментальними даними) тільки загальний еквівалентний модуль пружності шаруватої системи (за винятком пошарових штампових випробувань). Якщо ми маємо бажання перевірити конструкцію за критеріями міцності на розтяг при згині у монолітних шарах або на зсув, треба мати модулі пружності окремих шарів. Тому необхідно модулі пружності шарів визначати додатковими методами: експертна оцінка стану покриття, розкриття дорожнього одягу з оцінкою стану окремих шарів. Все це у сукупності дає дуже значний розкид даних і значні помилки.

Виходячи з цього, поставимо задачу: розробити метод визначення модуля пружності покриття і загального модуля пружності основи за даними вимірювання прогинів дорожнього одягу.

Для вимірювання прогину під колесом задньої вісі автомобіля використовують важільні прогиноміри різних конструкцій, оптичні прогиноміри і прецизійні нівеліри.

Чаша прогину (лінія впливу прогинів покриття) при дії навантаження для більш міцних нежорстких покриттях має радіус значно більший, ніж для слабких, і може становити більше ніж 1,5–2 метрів [2]. У цьому випадку опори прогиноміру можуть бути в зоні чаші, що в свою чергу, може призвести до похибки при вимірюванні прогину. Тому найбільш доцільним є використання прецизійного нівеліру, який дозволяє вимірювати прогин поверхні покриття з точністю до 0,01 мм. При цьому між спареними колесами задньої вісі автомобіля необхідно встановити спеціальну марку з підсвічуванням хреста сітки ниток для точної наводки зорового променя інструменту. Методика виконання вимірювань схожа до використання прогиноміру.

Загальне розв'язання задачі визначення міцності шарів дорожнього одягу за результатами випробувань

Як відомо, під дією навантаження колесом автомобіля або штампом дорожній одяг в зоні навантаження прогинається, утворюючи увігнуту по середині та опуклу по краях чашу прогину, кривизну середньої частини якої можна характеризувати радіусом R кривизни чаші прогину. Чашу прогину та її кривизну вивчала значна кількість дослідників в МАДІ, ХАДІ, Німеччині. Здебільшого на основі вимірювання чаші прогину радіус R визначали через відносні подовження монолітних шарів і напруження розтягу по низу покриття

$$s = \frac{Ee}{1-\nu^2}, \quad (1)$$

де E – модуль пружності верхнього шару, МПа;
 e – відносні подовження;
 ν – коефіцієнт Пуассона.

У формулі (1) модуль пружності покриття з замірів прогину визначити неможливо, але відомо, що кривизна чаші прогину і розмір чаші прогину залежать від деформаційних характеристик шаруватої системи.

За Одемарком радіус кривизни чаші прогину під колесом автомобіля можна визначити наступним чином:

$$R = \frac{4E_1 r}{3q} F_R, \quad (2)$$

де E_1 – модуль пружності верхніх монолітних шарів, МПа;
 q – питомий тиск від колеса, МПа;
 r – радіус відбитка колеса, см;
 F_R – функція двох параметрів: відношення товщини монолітних шарів h до r і відношення модулів верхнього E_1 і нижнього E_n шарів, де E_n – модуль пружності основи, МПа.

Таким чином, форма, розмір, кривизна R чаші прогину залежать від товщини монолітного шару і модулів пружності монолітного шару і основи.

В процесі польових випробувань чашу прогину визначають за величиною прогинів покриття під колесом автомобіля (під штампом) і в точках на певних відстанях від місця прикладення навантаження (0 м; 0,2 м; 0,4 м; 0,6 м; 0,8 м) і тому подібне. Очевидно, що сукупність прогинів у цих або інших точках покриття описує форму чаші прогину та її кривизну. Тоді, можна розробити розв'язання для шаруватої пружної системи з визначення

модуля пружності покриття та модуля пружності основи за величиною прогинів в декількох точках чаші прогину.

Розглянемо задачу про деформований стан двошарової системи, що складається із шару завтовшки h і пружного напівпростору (рис. 1). Вважається, що між цими тілами відсутнє повне зчеплення і можливе проковзання. Із конструкцією пов'яжемо циліндричну систему координат r, b, z , початок якої O приймемо в зоні контакту шарів, а вісь z спрямуємо прямовисно вниз. Модуль пружності та коефіцієнт Пуассона шару позначатимемо, відповідно, символами E_1, ν_1 , півпростору – E_2, ν_2 .

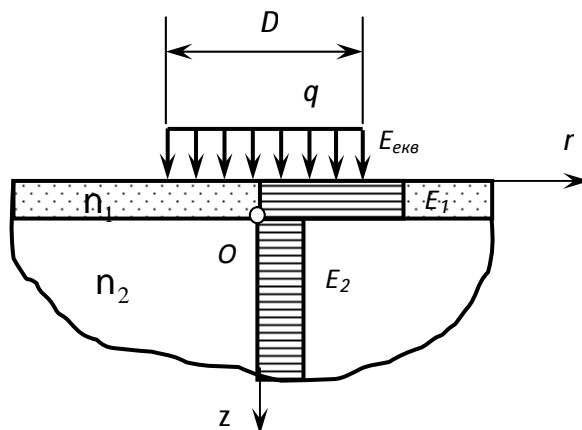


Рисунок 1 – Розрахункова схема

Конструкція знаходиться під впливом осесиметричного навантаження $f(r)$. Вважатимемо, що функцію $f(r)$ можна навести у вигляді зворотного перетворення Ганкеля (перетворення Бесселя-Фур'є) [3]:

$$f(r) = \int_0^{\infty} g(a) \times J_0(ar) \times a \times da, \quad (3)$$

$$g(a) = \int_0^{\infty} f(r) \times J_0(ar) \times r \times dr$$

де $J_0(ar)$ – функція Бесселя першого роду порядку 0.

Постає наступна задача: визначити модулі Юнга E_1, E_2 системи, якщо відомі прогини поверхні в двох точках: $r=r_1$ і $r=r_2$.

Для спрощення проблеми роботу верхнього шару вивчатимемо за допомогою лінійної теорії пружних частинок. Як довели попередні дослідження, такий підхід значно спрощує проблему, причому похибка у визначенні напружень і деформацій не перевищує 10 %.

Для визначення прогинів $w=w(r)$ поверхні пластинки скористаємося диференціальним рівнянням Софі Жермен:

$$DDw = \frac{f(r) + s(r)}{D}; \quad D = \frac{d}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr}, \quad (4)$$

де $D = \frac{E_1 \times h^3}{12(1 - \nu_1^2)}$ – циліндрична жорсткість пластини;

$S(r) = s_z|_{z=0}$ – нормальний тиск пластинки на поверхню напівпростору.

Будемо шукати $S(r)$, $w(r)$ у вигляді:

$$s(r) = \int_0^\infty A(a) \times J_0(ar) \times a \times da, \quad w(r) = \int_0^\infty B(a) \times J_0(ar) \times a \times da, \quad (5)$$

де $A(a)$, $B(a)$ – функції параметру a , що підлягають визначенню з крайових умов.

Підставляючи залежності (3), (5) у рівняння (4), знаходимо:

$$B(a) = \frac{g(a) + A(a)}{a^3 \times D}. \quad (6)$$

Для визначення $A(a)$, $B(a)$ слід мати ще одне рівняння. Для цього скористаємося для визначення напружень s_z , t_{rz} і вертикальних переміщень U_z у півпросторі формулами:

$$\begin{aligned} s_z &= \int_0^\infty g(a) \times p_3(z, a) \times J_0(ar) \times a \times da; \\ t_{rz} &= - \int_0^\infty g(a) \times p_4(z, a) \times J_1(ar) \times a \times da; \\ U_z &= \int_0^\infty g(a) \times p_2(z, a) \times J_0(ar) \times da, \end{aligned} \quad (7)$$

де $p_3(z, a) = [C_1 + az(B_1 + C_2)]e^{-az}$;

$p_4 = [C_2 - az(C_1 + C_2)]e^{-az}$;

$p_2(z, a) = - \frac{1}{2G_2} [2(1 - \nu_2)C_1 + (1 - 2\nu_2)C_2 + az(C_1 + C_2)]e^{-az}$;

$G_2 = \frac{E_2}{2(1 + \nu_2)}$,

де C_1 , C_2 – невідомі функції параметру інтегрування a , які можуть бути визначені з умов на поверхні напівпростору.

Так з умови $t_{rz}|_{z=0} = 0$ випливає, що $C_2 = 0$.

Вимоги для зони контакту шарів ($z=0$): $s_z = S(r)$, $U_z = w(r)$ задовольняються, якщо:

$$A(a) = - \frac{g(a)}{1 + \frac{4}{3}ml^3}; \quad m = \frac{1 - \nu_2^2}{1 - \nu_1^2} \times \frac{E_1}{E_2} \times \frac{\pi h^3}{4D}; \quad l = a > d. \quad (8)$$

Тут і нижче вважається, що зовнішнє навантаження $f(r)$ діє на площі круга радіуса $d = \frac{D}{2}$.

Із залежностей (5), (6), (7), замінивши змінну a на l , отримуємо:

$$w = \frac{2(1 - n_2^2)}{d \times E_2} \times \int_0^r \frac{g(a)}{1 + \frac{4}{3}ml^3} \times J_0(lr) dl ; \quad (r = \frac{r}{d})$$

Розглянемо найпростіший випадок, коли зовнішнє навантаження рівномірно розподілене на площі круга радіуса d . У цьому випадку з формули (3) отримуємо:

$$g(a) = q \times d^2 \times l^{-1} \times J_1(l) ;$$

$$w(r) = \frac{2(1 - n_2^2) \times q \times d}{E_2} \times t(m, r), \quad (9)$$

де
$$t(m, r) = \int_0^r \frac{J_1(l) \times J_0(lr) dl}{1 + \frac{4}{3}ml^3}$$

Чисельна реалізація задачі визначення модулів пружності двошарової системи за результатами вимірювань прогинів поверхні системи в двох точках

Припустимо, що шляхом експериментальних вимірювань за певних значеннях $r = r_1$ і $r = r_2$ визначено прогини поверхні конструкції $w(r_1)$ і $w(r_2)$, а також встановлено співвідношення:

$$k = \frac{w(r_2)}{w(r_1)}$$

Тоді згідно з формулою (9) встановлюємо:

$$k = \frac{t(m, r_2)}{t(m, r_1)}, \quad (r_1 = \frac{r_1}{d}, r_2 = \frac{r_2}{d}), \quad (10)$$

та будуємо графіки функцій $m = m(k)$ і $t(m, r)$ [4].

Тоді згідно з (9) визначаємо загальний еквівалентний модуль пружності основи:

$$E_2 = \frac{2(1 - n_2^2)}{w(r_1)} \times q \times d \times t(m, r_1), \quad (11)$$

а з (8) визначаємо модуль шару покриття:

$$E_1 = \frac{1 - n_1^2}{1 - n_2^2} \times m \times E_2 \times \frac{d^3}{h^3} \quad (12)$$

ОЦІНКА ЯКОСТІ

Розв'язання реалізовано у вигляді програми автоматизованого розрахунку (рис. 2). Вихідними даними для роботи програми є:

- діаметр штампку, рівновеликого діаметру відбитка колеса, см;
- питомий тиск колеса на покриття, МПа;
- товщина шарів покриття та товщина шарів основи, що визначаються за результатами георадарного обстеження, см [5];
- коефіцієнти Пуассона покриття та основи;
- коефіцієнт розподільчої здатності основи;
- координати точок вимірювання прогинів під дією навантаження, см;
- величина прогинів у точках вимірювання, см.

Рисунок 2 – Вікно введення вихідних даних

Програма містить процедуру коригування модуля пружності залежно від температури повітря в період обстеження. Процедура базується на [6]:

- визначенні глибини зі стаціонарною температурою ґрунту;
- розрахунку загального теплового опору конструкції дорожнього одягу;
- розрахунку температури на границі шарів конструкції;
- визначенні температури кожного шару конструкції;
- встановленні модуля пружності та коефіцієнта Пуассона асфальтобетонних шарів залежно від температури шару.

Результатом роботи програми є

- розрахункові значення модуля пружності покриття та загального еквівалентного модуля пружності основи (рис.3);
- графічне зображення розрахункової чаші прогину (рис.4).

Рисунок 3 – Вікно результатів розрахунків

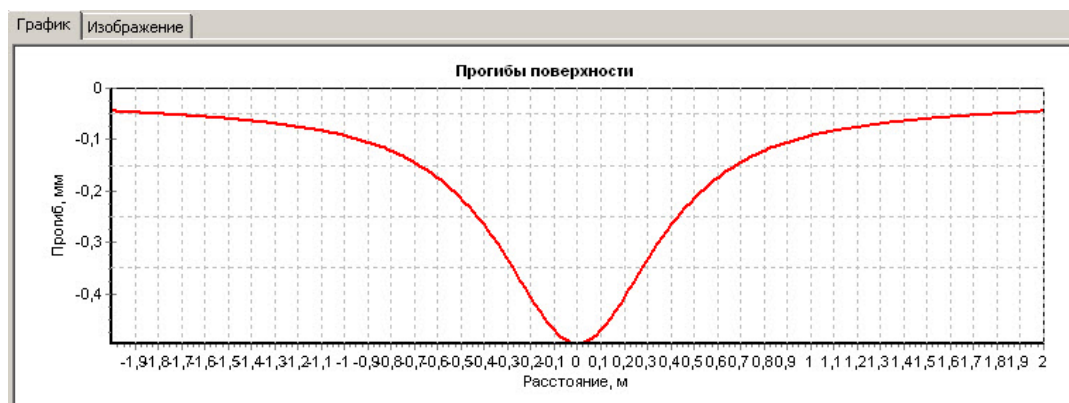


Рисунок 4 – Графік розрахункової чаші прогину

Висновки

1. Запропонований метод розрахунку, заснований на загальному розв’язанні напружено-деформованого стану шаруватої системи, дозволяє визначати модуль пружності шару покриття та еквівалентний модуль пружності основи за чашею прогину.
2. Чисельна реалізація задачі визначення модулів пружності двошарової системи за результатами польових вимірювань прогинів конструкції дорожнього одягу в двох точках методами статичного навантаження доводить достатню достовірність отриманих результатів (похибка в визначенні модулів пружності складає не більше ніж 10 %).
3. Програма автоматизованого розрахунку, що реалізує запропонований метод розрахунку, дозволяє в оперативному режимі отримувати інформацію про деформаційні параметри конструкції за результатами польових випробувань.

Література

1. Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу: ВБН В.2.3-218-186-2004. – [Чинний від 2005-01-01]. – К.: Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2005. – 176 с. – (Відомчі Будівельні Норми).
2. Рекомендации по оценке прочности нежестких дорожных одежд по чаше прогиба: ДМД 02191.5.008-2009. [Действующий от 2009-09-10]. – Минск: Минтранс, 2009. – 15 с. – (Дорожный методический документ).
3. Плевако В.П. Теоретичні основи визначення параметрів пружності дорожнього одягу при випробуваннях / В.П. Плевако, В.М. Ряпухін // Вісник ХНАДУ: зб. наукових праць. – Харків : ХНАДУ, 2002. – Вип. 19. – С. 53–55.
4. Плевако В.П. Оценка прочности слоистой системы по кривой прогибов при нагружении / В.П. Плевако, В.Н. Ряпухин, В.В. Безродный // Вісник ХНАДУ: зб. наукових праць. – Харків : ХНАДУ, 2005. – Вип. 31. – С. 74–76.
5. Рекомендації щодо визначення товщини конструктивних шарів існуючого дорожнього одягу : Р В. 2.3-218-02071168-781:2011 –[Чинний від 2001-12-12]. – К.: Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2011. – 58 с. – (Рекомендації).
6. Сиденко В.М. Дорожные одежды с парогидроизоляционными слоями / В.М. Сиденко, О.Т. Батраков, Ю.А. Покутнев. – М.: Транспорт, 1984. – 144 с.